

論文 炭素繊維シートによるコンクリート柱の拘束効果に関する実験的研究

中出 睦^{*1}・米奥久貴^{*2}・瀧川正四郎^{*1}

要旨：本研究では、炭素繊維の拘束効果によるコンクリート柱の曲げ耐力およびそれに伴う変形性能の向上を耐震補強に取り入れるため、炭素繊維シートで補強したコンクリート柱試験体の一軸圧縮試験を行い、コンクリートの圧縮応力度-軸ひずみ関係を求めた。実験結果より、コンクリートの圧縮応力度-軸ひずみ関係に影響を及ぼす要因を把握し、これらの要因を考慮したコンクリートの圧縮応力度-軸ひずみ関係を検討した。

キーワード：炭素繊維, 拘束効果, 圧縮応力度-軸ひずみ関係

1. はじめに

炭素繊維シート（以下、CFS）巻き立て工法に関しては、いくつかの指針等が出ているが、CFS の拘束効果による曲げ耐力とそれに伴う変形性能の向上は考慮されていないのが現状である^{1),2)}。

本研究では、コンクリート角柱試験体を対象とし、コンクリート強度、CFS の種別と補強量をパラメータとした一軸圧縮試験を行い、CFS の拘束効果によるコンクリートの圧縮応力度-軸ひずみ関係の性状を把握し、CFS の拘束効果を考慮したコンクリートの応力度-軸ひずみ関係を検討する。

2. 実験概要

図-1 に試験体形状、表-1 に試験体一覧と試験体の実験結果および CFS の材料試験結果を示す。試験体は合計 17 体で、辺長 200mm の正方形断面を有する高さ 400mm の四角柱とした。ここで、CFS の拘束効果に及ぼす要因として、コンクリート基準強度 F_c 、CFS 体積比 ρ_{CF} 、CFS の種類を採用し、それぞれ $F_c = 21 \sim 36 \text{ N/mm}^2$ の 4 水準、 $\rho_{CF} = 0 \sim 1.11\%$ の 6 水準、種類は高強度と高弾性の 2 タイプとした。

また、応力集中による CFS の破断を防ぐために、コーナー部は半径 10mm（高弾性タイプは 20mm）で面取りを行った。CFS は厚さ 0.111mm とし、0.5 層巻きは幅 40mm で間隔 @50mm とし、重ね継手長さ

を 100mm とし、エポキシ系接着樹脂で試験体に接着した。

試験体には、変位制御（毎分 0.1mm の載荷速度）によって単調一軸圧縮状態で荷重を作用させ、荷重、載荷盤間変位とコンクリート表面軸ひずみ（ひずみゲージ 2 箇所）、および CFS 表面の横ひずみを計測した。

3. 実験結果

3.1 破壊性状

写真-1 に、無補強試験体（FC36-0）と CFS を巻いた試験体（FC24-3）の最終状況の一例を示す。

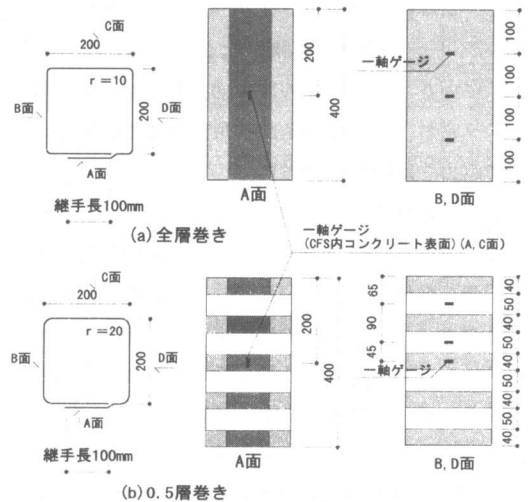


図-1 試験体形状とひずみゲージ位置図

*1 日産建設（株） 技術研究所 工修（正会員）

*2 日産建設（株） 技術研究所 （正会員）

表-1 試験体一覧と実験結果

試験体	炭素繊維シート(CFS)					実験結果(最大圧縮強度時)			
	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	破断歪 (μ)	巻数 N	体積比 ρ _{CF} (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	強度比	軸歪 (μ)	横歪 (μ)
FC21-0	4170 (高強度タイプ)	248 面取10mm	17400	0	0	23.6	1.00	1988	-
FC21-1				1	0.222	24.4	1.03	2299	1336
FC21-2				2	0.444	26.8	1.13	3411	1957
FC21-3				3	0.666	27.0	1.15	3883	3055
FC24-0				0	0	26.1	1.00	2138	-
FC24-1				1	0.222	29.1	1.11	2937	1842
FC24-3				3	0.666	32.7	1.25	3489	1414
FC24-5				5	1.11	31.8	1.22	2344	1474
FC24-0.5e	3840 (高弾性タイプ)	390 面取20mm	9800	0.5	0.111	28.9	1.11	2512	1540
FC24-1e				1	0.222	30.4	1.16	2688	1789
FC24-5e				5	1.11	38.6	1.48	10428	6470
FC27-0	4170 (高強度タイプ)	248 面取10mm	17400	0	0	28.8	1.00	1750	-
FC27-1				1	0.222	31.2	1.08	2169	2395
FC27-2				2	0.444	33.5	1.16	2408	2606
FC36-0				0	0	34.0	1.00	2297	-
FC36-1				1	0.222	38.2	1.12	2504	2179
FC36-2				2	0.444	39.0	1.15	4648	2629

$\rho_{CF} = 4 \times N \times t_{CF} / d$; t_{CF} : CFS1層の厚さ(mm), N: CFSの巻立て層数, d: 辺長(mm)

強度比: 各シリーズの無補強コンクリートに対する最大圧縮応力度の比

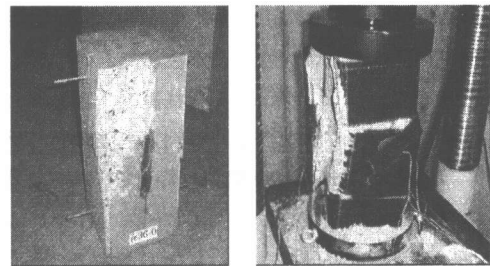
無補強試験体 (FC36-0) は、圧縮応力度が最大値に達するまでは外観上の変化は見られなかったが、最大圧縮応力度に達して圧縮応力度が低下し始めると、試験体上部のコーナー部から斜め方向にひび割れが生じ始めた。その後、ひび割れは徐々に進展し、最終的には軸方向に割れるように破壊して急速に耐力が低下した。

CFS を巻いた試験体 (FC24-3) では、最大応力度に達したあたりから側面の一部が盛り上がり始めた。これは内部のコンクリートに圧壊が生じて、コンクリートの体積膨張が起こっていることを現している。CFS はこの体積膨張を拘束していると考えられ、その後 CFS が隅角部近辺で破断するまで耐力を維持しつづけた。

3.2 圧縮強度

表-1 に実験結果を併せて示す。表中の強度比は、無補強試験体に対する CFS 補強した試験体の最大圧縮強度の上昇率、軸ひずみはコンクリート表面に貼付したゲージによる値、横ひずみは CFS 側面中央部に貼付したゲージによる値である。

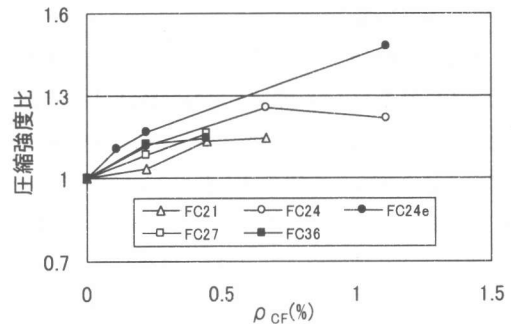
図-2 に CFS 体積比 ρ_{CF} と圧縮強度比の関係を示す。CFS 量の増加に伴い最大圧縮強度の上昇が見られたが、高強度 CFS で補強した試験体では、コンクリート基準強度による差異は明瞭には見られなかった。しかし、高弾性 CFS で補強した試験体



FC36-0

FC24-3

写真-1 試験体破壊状況

図-2 CFS体積比 ρ_{CF} と圧縮強度比

では、 ρ_{CF} の増大に伴い最大圧縮強度上昇率がやや大きくなる傾向を示している。これは、弾性係数の違いだけでなく、高弾性 CFS で補強した試験体の隅角部の面取り半径が高強度 CFS 試験体より大きいことによる拘束効果の増大がその一要因として考えられる。

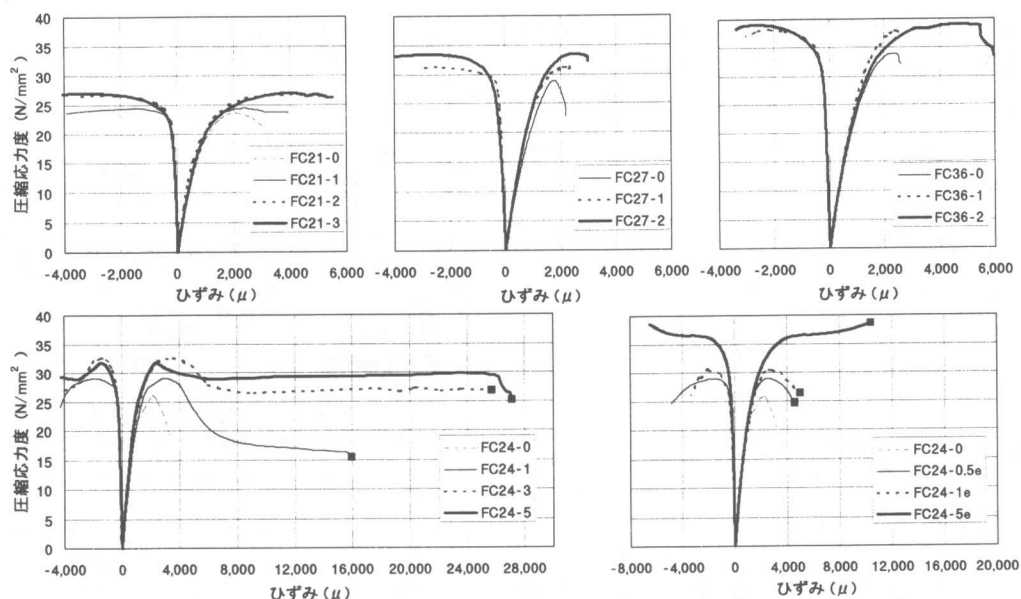


図-3 圧縮応力度-ひずみ曲線

3.3 圧縮応力度とひずみ

コンクリートの圧縮応力度-ひずみの関係を図-3に示す。ひずみは正が軸ひずみ、負が側面中央部における横ひずみを示している。CFS 破断まで加力を行わなかった FC21, 27, 36 シリーズの軸ひずみはゲージの値であるが、CFS 破断まで加力を行った FC24 シリーズは、ゲージ計測が不能になった最大耐力以降は、载荷盤間を変位計で計測した変位より求めた値を示し、■は CFS 破断点である。すべての試験体で初期剛性は約 $3.0 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 、ポアソン比は 0.2 程度を示しており、CFS による影響は見られない。

無補強試験体では、軸ひずみが約 1700~2300 μ で最大圧縮応力度に達した後、急激な耐力低下を示している。CFS で補強した場合、最大圧縮応力度時の軸ひずみは、約 2100~4600 μ 程度となり無補強時より大きくなる傾向が見られる。CFS の横ひずみは 500 μ 辺りを境に増加割合が急増し、1300~3100 μ となったところで圧縮応力度が最大となり、それ以降 CFS の横ひずみが増加してコンクリートの圧縮応力度は減少する傾向があった。これは、コンクリートの圧壊が進展して、急

速にコンクリートの体積膨張が生じたことを現している。 ρ_{CF} が増加するにつれて最大圧縮応力度は増加し、その後の下降勾配は緩やかになり変形性能が向上する。ただし、 ρ_{CF} が大きいと下降勾配が現れず CFS 破断まで圧縮応力度が上昇し続けるものも見られた (FC24-5e)。

これらのことより、最大圧縮応力度付近から CFS による拘束効果が現れてくることがわかる。

高弾性 CFS で補強すると、高強度 CFS に比べて圧縮強度比の上昇はやや大きい、それまでの性状は高強度 CFS と変わらない。高弾性 CFS の破断ひずみが小さいため、最大耐力後に早期に破断して破壊している。

4. CFS の拘束効果を考慮した応力-軸ひずみ

4.1 圧縮応力度-軸ひずみ関係モデル

CFS 拘束効果を考慮したコンクリートの圧縮応力度-軸ひずみ関係モデルは、既にいくつか提案されており、その中の 1 つに図-4 に示す細谷・川島らの提案モデルがある³⁾。このモデルは、圧縮応力度を軸ひずみの指数関数および一次関数でモデル化するもので、(1)~(3)式で提案され、こ

これらの式を満たす各特性値 f_t , ε_t , E_g , ε_{cu} の評価法を提案している。この提案式は、コンクリート設計基準強度が同一の試験体の実験結果から求めているので、本研究では、コンクリート圧縮強度を考慮に入れた f_t , ε_t , E_g , ε_{cu} の評価法を検討する。

・第1領域 ($0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_t$)

$E_g < 0$ の場合

$$f_c = E_c \varepsilon_c \left\{ 1 - \frac{1}{n} \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_t} \right)^{n-1} \right\} \quad (1)$$

ただし、 $n = \frac{E_c \varepsilon_t}{E_c \varepsilon_t - f_t}$

$E_g \geq 0$ の場合

$$f_c = E_c \varepsilon_c \left\{ 1 - \frac{1}{n} \left(1 - \frac{E_g}{E_c} \right) \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_t} \right)^{n-1} \right\} \quad (2)$$

ただし、 $n = \frac{(E_c - E_g) \varepsilon_t}{E_c \varepsilon_t - f_t}$

・第2領域 ($\varepsilon_t \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}$)

$$f_c = f_t + E_g (\varepsilon_c - \varepsilon_t) \quad (3)$$

ここで、

ε_{cu} = コンクリートの終局軸ひずみ

E_c = 初期弾性係数 (N/mm^2)

E_g = 第2領域における勾配 (N/mm^2)

f_t = 第1領域から第2領域への変化点でのコンクリートの圧縮応力度 (N/mm^2)

($E_g \leq 0$ の場合、 $f_t = f_{co}$)

4.2 第1領域と第2領域の変化点圧縮応力度 f_t

細谷・川島らは、CFSの拘束効果を $\rho_{CF} \varepsilon_{CFt} E_{CF}$ で評価し、 f_t と拘束効果 $\rho_{CF} \varepsilon_{CFt} E_{CF}$ の関係を無補強コンクリートの圧縮強度 f_{co} で無次元化して求めている。この関係を本実験に適用したものを図-5に示す。ここで、図中の示す数字は、CFSの巻き数を表す。また、第1領域から第2領域への変化点でのCFSの横ひずみである ε_{CFt} は、実験結果から 2000μ と仮定した。

図より、 f_t / f_{co} と $\rho_{CF} \varepsilon_{CFt} E_{CF} / f_{co}$ は、圧縮強度による差異は顕著には見られず、ほぼ線形関係にあり、(4)式の関係が得られる。

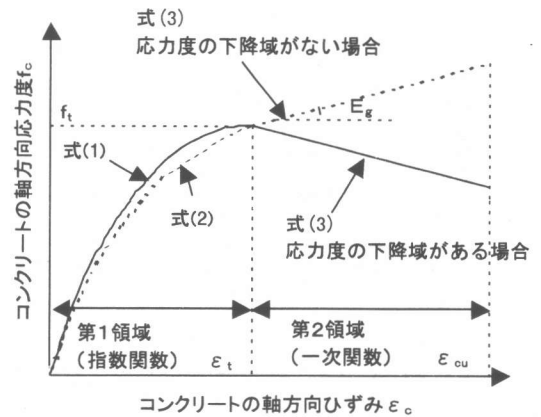


図-4 コンクリートの圧縮応力度-軸圧縮ひずみ³⁾

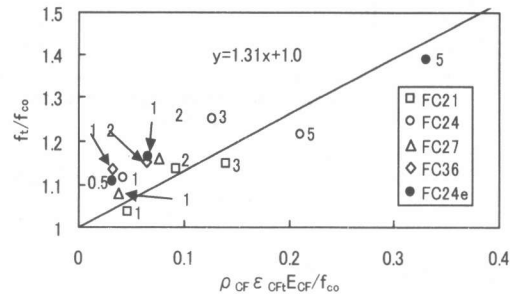


図-5 f_t/f_{co} と $\rho_{CF} \varepsilon_{CFt} E_{CF}/f_{co}$ の関係

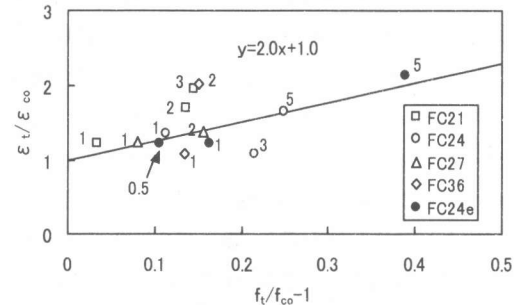


図-6 $\varepsilon_t/\varepsilon_{co}$ と $f_t/f_{co} - 1$ の関係

$$\frac{f_t}{f_{co}} = 1.0 + 1.31 \frac{\rho_{CF} \varepsilon_{CFt} E_{CF}}{f_{co}} \quad (4)$$

ここで、

f_{co} = 無補強コンクリートの最大圧縮応力度

(N/mm^2)

ε_{CFt} = 第1領域から第2領域への変化点でのCFSの横ひずみ (= 2000μ)

E_{CF} = CFSの弾性係数 (N/mm^2)

4.3 第1領域と第2領域の変化点ひずみ ε_t

細谷・川島らの研究は、コンクリートの設計基

準強度が同一の試験体の実験結果であるため、コンクリートの圧縮強度や無補強コンクリートの最大応力度時のひずみ ε_{co} による影響が加味されていない。したがって、Mander ら⁴⁾の圧縮応力度-軸ひずみ関係を適用して、 $\varepsilon_t/\varepsilon_{co}$ と f_t/f_{co} の関係を求めると図-6 のようになる。ここで、図中の示す数字は、CFS の巻き数を表す。これより、両者の関係は、ほぼ線形関係にあることがわかる。

これらの結果から、変形性能の過大評価を避けるため安全性を考慮して計算値より実験値の過半数が上回る(5)式を求めた。

$$\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{co}} = 1.0 + 2.0 \left\{ \left(\frac{f_t}{f_{co}} \right) - 1 \right\} \quad (5)$$

4.4 第2領域の直線勾配 E_g

細谷・川島らの提案式では、CFS で拘束した場合の E_g と $f_{co}^2/\rho_{CF}\varepsilon_{CFt}E_{CF}$ および E_g と $\sqrt{\rho_{CF}}E_{CF}$ が線形関係にあることが示されている。そこで、第2領域の直線勾配 E_g が比較的明瞭に得られた FC21-1, FC27-1, 2 と CFS の破断まで軸ひずみが計測できた FC24-1, 3, FC24-0.5 e, 5e の7体を対象として E_g と $f_{co}^2/\rho_{CF}\varepsilon_{CFt}E_{CF}$ の関係を図-7 に、 E_g と $\sqrt{\rho_{CF}}E_{CF}$ の関係を図-8 に示す。ここで、 ε_{CFt} は 2000μ として与えられるため、 $\rho_{CF}\varepsilon_{CFt}E_{CF}$ はコンクリートが破壊する時に CFS に生じている拘束効果を表している。

これらの図より、 E_g と $f_{co}^2/\rho_{CF}\varepsilon_{CFt}E_{CF}$ および $\sqrt{\rho_{CF}}E_{CF}$ はほぼ線形関係にあることが確認できた。

また、この関係では、圧縮強度による顕著な差は見られなかった。

以上のことより、 E_g は式(6)のようになる。

$$E_g = -3.92 \frac{f_{co}^2}{\rho_{CF}\varepsilon_{CFt}E_{CF}} + 0.032\sqrt{\rho_{CF}}E_{CF} \quad (6)$$

4.5 終局軸ひずみ ε_{ou}

細谷・川島らは、終局軸ひずみ ε_{ou} に及ぼす変数として $\rho_{CF}f_{CF}/f_{co}$ と f_{CF}/E_{CF} を挙げている。変化点のひずみ ε_t と同様に ε_{co} による影響が加味されていないので、これらの変数を用いて、CFS 破断時

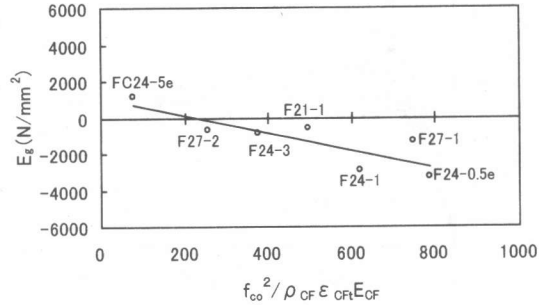


図-7 E_g と $f_{co}^2/\rho_{CF}\varepsilon_{CFt}E_{CF}$ の関係

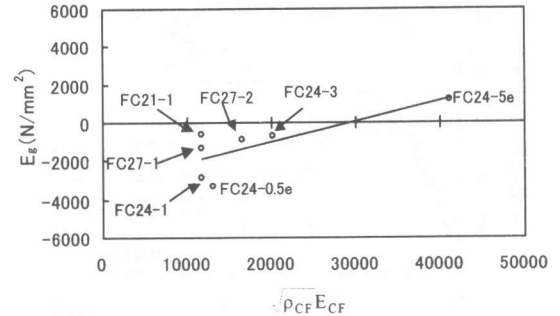


図-8 E_g と $\sqrt{\rho_{CF}}E_{CF}$ の関係

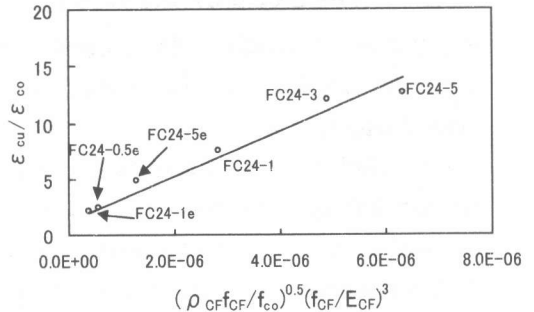


図-9 $\varepsilon_{ou}/\varepsilon_{co}$ と $(\rho_{CF}f_{CF}/f_{co})^{0.5}(f_{CF}/E_{CF})^3$ の関係

まで行った FC24 シリーズの実験結果を対象として $\varepsilon_{ou}/\varepsilon_{co}$ との関係と求めると図-9 に示すように、 $\varepsilon_{ou}/\varepsilon_{co}$ と $(\rho_{CF}f_{CF}/f_{co})^{0.5}(f_{CF}/E_{CF})^3$ が線形関係にあることがわかった。

以上のことより、 $\varepsilon_{ou}/\varepsilon_{co}$ は次式のように与えられる。

$$\varepsilon_{ou}/\varepsilon_{co} = 1.2 + 2.0 \times 10^6 \left(\frac{\rho_{CF}f_{CF}}{f_{co}} \right)^{0.5} \left(\frac{f_{CF}}{E_{CF}} \right)^3 \quad (7)$$

ここで、 f_{CF} = CFS の引張強度 N/mm^2)

4.6 検討式による圧縮応力度-軸ひずみ関係

(1) ~ (7) 式から求められるコンクリートの圧

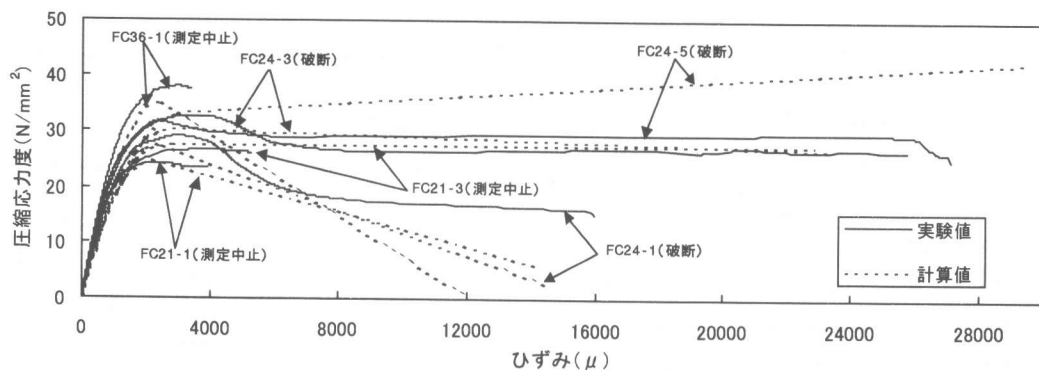


図-10 計算値と実験値の比較(高強度タイプ)

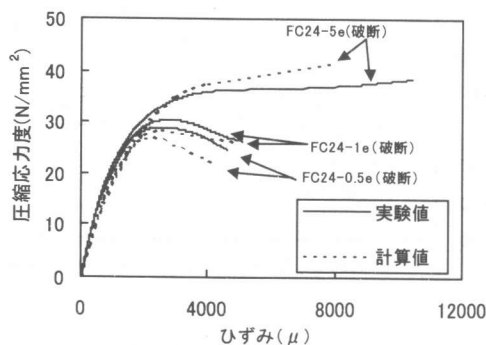


図-11 計算値と実験値の比較(高弾性タイプ)

縮応力度-軸ひずみ関係の計算値と実験値を比較した結果を高強度タイプ、高弾性タイプ各々図-10および図-11に示す。

ここで、図中の○には、実験終了状態、すなわちCFS破断または測定中止を示した。全体として、第2勾配 E_g に差異がある試験体が見られるものの、圧縮強度の違いによる顕著な違いは見られず、初期剛性および最大圧縮強度を含め、比較的良好な対応を示しており、CFSの拘束効果をよく表している。

5. まとめ

本研究では、CFSで補強されたコンクリート柱試験体の一軸圧縮試験を行い、コンクリートの圧縮応力度-軸ひずみ関係を求めて、以下のような知見を得た。

(1) CFSの拘束効果によって $\rho_{CF}=0.111\sim0.666\%$ の試験体では、 ρ_{CF} の増大に伴って最大圧縮強度は増大し、最大圧縮応力度後の2次勾配は緩やかに減少する。

(2) ρ_{CF} が1.11%程度に大きくなると、コンクリート柱の圧縮応力度は、CFSが破断するまで上昇し続ける傾向がみられた。

(3) CFSで拘束されたコンクリートの圧縮応力度-軸ひずみ関係モデルを与えるために必要な特性値、①第1領域から第2領域への変化点の圧縮応力度 f_t と軸ひずみ ϵ_t 、②第2領域における直線勾配 E_g 、③終局軸ひずみ ϵ_{cu} の評価法を検討して求めた。

計算値は、圧縮強度の違いや無補強コンクリートの最大応力度時のひずみ ϵ_{co} による影響を反映して、初期剛性および最大圧縮強度を含め、実験値と比較的良好に対応した。

参考文献

- 炭素繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針、土木学会、2000.12
- 連続繊維補強材を用いた既存鉄筋コンクリート造及び鉄骨鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修・施工指針、(財)日本建築防災会、1999.7
- 細谷学、川島一彦、星隅順一：炭素繊維シートで横拘束したコンクリート柱の応力度-ひずみ関係の定式化、土木学会論文集、No.592/V-39, pp.37~52, 1998.5
- J.B.Mander, M.J.N.Priestley and R.Park: Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol.114, No.8, pp.1804-1826, August, 1988